

octobre 2009

RADIOPROTECTION : RADIONUCLÉIDES

ED 4302

$^{14}_6\text{C}$

Carbone-14

- ▷ Émetteur β^- (énergie maximale de 156,5 keV)
- ▷ Période physique = 5 730 ans
- ▷ Période effective \approx 40 jours (chez l'adulte)

- ▷ **Organes cibles** = organisme entier
- ▷ **Surveillance du poste de travail** : mesures de contamination surfacique (contaminamètre ou frottis)
- ▷ **Surveillance individuelle de l'exposition externe** : dosimétrie des extrémités
- ▷ **Surveillance individuelle de l'exposition interne** : analyse radiotoxicologique des urines

Le carbone pur est présent dans la nature sous deux formes : le graphite de couleur grise et le diamant de couleur transparente.

La forme la plus courante du carbone est le dioxyde de carbone CO_2 , qui est l'un des composants minoritaires de l'atmosphère terrestre, produit et métabolisé par les êtres vivants.

À l'état naturel, le carbone a deux isotopes stables : le carbone-12 (environ 99%), le carbone-13 (environ 1%) et un isotope radioactif, le carbone-14 ($2 \cdot 10^{-10}\%$).

1. CARACTÉRISTIQUES

Origine

Le carbone-14 a deux origines : naturelle, source la plus importante (environ 98%), et artificielle, produit par les activités humaines.

Le carbone-14 naturel est produit dans la haute atmosphère essentiellement par réaction des neutrons cosmiques sur les atomes d'azote.

Le carbone-14 artificiel présent dans l'environnement est dû aux essais nucléaires atmosphériques (de 1945 à 1980) et dans une moindre mesure aux rejets des installations nucléaires et à l'utilisation en médecine et biologie.

Cette fiche fait partie d'une série qui se rapporte à l'utilisation de radionucléides en sources non scellées.

L'objectif n'est pas de se substituer à la réglementation en vigueur, mais d'en faciliter la mise en œuvre en réunissant sur un support unique, pour chaque radionucléide, les informations les plus pertinentes ainsi que les bonnes pratiques de prévention à mettre en œuvre.

Ces fiches sont réalisées à l'intention des personnes en charge de la radioprotection : utilisateurs, personnes compétentes en radioprotection, médecins du travail.

Sous ces aspects, chaque fiche traite :

- 1. des propriétés chimiques, radiophysiques et biologiques,*
- 2. des utilisations principales,*
- 3. des paramètres dosimétriques,*
- 4. du mesurage,*
- 5. des moyens de protection,*
- 6. de la délimitation et du contrôle des locaux,*
- 7. du classement, de la formation et de la surveillance du personnel,*
- 8. des effluents et déchets,*
- 9. des procédures administratives d'autorisation et déclaration,*
- 10. du transport,*
- 11. de la conduite à tenir en cas d'incident ou d'accident.*

Les formes chimiques de carbone-14 varient suivant le mode de production. Dans l'environnement, il existe sous deux formes principales :

- à l'état de CO₂ (forme minérale), il se comporte comme le dioxyde de carbone stable : il peut rester sous forme de gaz dans l'air, et se transforme en bicarbonate et carbonate dans l'eau ;
- au cours de la photosynthèse (forme organique), le CO₂ est incorporé dans la matière organique dont il constitue le squelette carboné. Il y a donc rapidement un équilibre entre l'activité spécifique du carbone atmosphérique et celle de la matière organique végétale en cours de synthèse.

Le carbone-14 peut également exister sous d'autres formes. Dans les effluents gazeux des réacteurs à eau pressurisée, il est admis que 80 % du carbone-14 se trouve sous forme organique (notamment CH₄) contre 20 % sous forme de CO₂. Dans les rejets liquides, les formes chimiques sont soit des carbonates, soit des composés organiques indéterminés.

Propriétés radiophysiques

Période radioactive : 5 730 ans

Le carbone-14 est un émetteur β⁻ de faible énergie, dont le spectre continu a pour énergie maximale 156,5 keV et une énergie moyenne de 49,4 keV.

▽ Filiation du carbone-14

Tableau I

Produit de filiation	¹⁴ ₇ N
Équation	¹⁴ ₆ C → β ⁻ → ¹⁴ ₇ N stable

Propriétés biologiques

Chez l'homme, la source d'incorporation de carbone-14 est surtout alimentaire. L'absorption digestive du carbone est pratiquement complète, mais la distribution dans l'organisme dépend de la forme chimique d'entrée. Cependant, pour certains composés d'origine végétale ou pour certains lipides, l'absorption peut être beaucoup moins complète.

Le carbone-14 absorbé est éliminé du corps humain avec une période biologique de 40 jours pour les adultes (période estimée sur la base du renouvellement du carbone dans l'organisme).

Modèle biocinétique du carbone :

- Carbone minéral : la mauvaise absorption du carbone minéral et l'élimination très rapide d'une grande partie de la fraction absorbée expliquent le peu de données sur son métabolisme. Il faut noter qu'au cours de l'inhalation, environ 1 % du carbone à l'état de CO₂ est retenu dans l'organisme par suite de la mise en solution sous forme de bicarbonate. Sous cette forme, une partie se fixe dans l'os.
- Carbone organique : le modèle biocinétique suppose que tous les composés organiques absorbés se retrouvent dans le sang et se distribuent rapidement et uniformément dans tous les

organes et tissus du corps. Des modèles à plusieurs exponentielles sont cependant nécessaires pour décrire le métabolisme des molécules de carbone organique car les localisations et les cinétiques de rétention sont différentes selon leur type.

En cas d'inhalation, les voies respiratoires supérieures et les poumons sont les organes contribuant le plus à la dose efficace.

En cas d'ingestion, l'organe contribuant le plus à la dose efficace est l'estomac.

2. UTILISATIONS

Dans le domaine de la recherche, le carbone-14 est très utilisé sous forme de carbonates pour le marquage isotopique des molécules. Les activités employées sont supérieures au GBq.

Par exemple, le carbone-14 permet d'étudier les anomalies métaboliques liées au diabète, à l'anémie, à la goutte ou à l'acromégalie, et peut être également utilisé comme marqueur pour suivre le métabolisme de nouvelles molécules pharmaceutiques.

3. PARAMÈTRES DOSIMÉTRIQUES

Exposition externe ⁽¹⁾

Note préalable : les données dosimétriques ci-après sont obtenues par le calcul, en l'absence de toute protection.

La grandeur $\dot{H}_p(0,07)$ correspond au débit d'équivalent de dose à la peau. Lors de la manipulation de carbone-14, seules les situations suivantes donnent lieu à un débit de dose significatif.

▽ Débit d'équivalent de dose en μSv/h pour une source de 1 MBq

Tableau II

	Débit d'équivalent de dose en μSv/h pour 1 MBq		
	Au contact d'une seringue de 2 ml	Au contact d'une seringue de 5 ml	À 10 cm d'une source ponctuelle
$\dot{H}_p(0,07)$	1,2 · 10 ⁰	5,2 · 10 ⁻¹	1,9 · 10 ²

Pour les solutions de carbone-14 contenues dans un flacon de 10 ml en verre standard rempli au tiers, les valeurs obtenues sont toutes inférieures à 10⁻² μSv/h pour 1 MBq.

Contamination cutanée

Une contamination cutanée de 1 MBq par cm² délivre un débit de dose à la peau [$\dot{H}_p(0,07)$] de l'ordre de 320 mSv/h.

¹ Les débits d'équivalent de dose [$\dot{H}_p(0,07)$] et [$\dot{H}_p(10)$] ont été calculés avec un code Monte-Carlo (MCNPX). Pour le rayonnement β, le spectre publié dans le rapport 56 de l'ICRU (1997) est utilisé.

Exposition interne

Exposition interne due à une contamination aiguë

▽ Doses efficaces engagées à la suite d'incorporation de 1 Bq, (DPI) pour les travailleurs de plus de 18 ans [Logiciel IMBA Professional – HPA]

Tableau III

Forme		Inhalation de 1 Bq (µSv)
C particulaire (5 µm)	F	2,9.10 ⁻⁴
	M	1,7.10 ⁻³
	S	4,0.10 ⁻³
Gaz carbonique (CO ₂)		6,2.10 ⁻⁶
Monoxyde de carbone (CO)		8,0.10 ⁻⁷
Méthane marqué au carbone-14		2,9.10 ⁻⁶

Forme	Ingestion de 1 Bq (µSv)
Composés organiques marqués	5,8.10 ⁻⁴

Compte tenu de la période effective du carbone-14, les doses engagées sur un an sont identiques à celles engagées sur 50 ans.

Exposition interne due à une contamination chronique

Pour 1 Bq/jour pendant n jours, multiplier les valeurs précédentes par n (hypothèse linéaire).

4. DÉTECTION ET MESURES

▽ Mesures de surveillance à réaliser

Tableau IV

	Appareil de mesure	Mise en œuvre
Mesure de débit de dose ambiant (µSv/h)	Pas d'intérêt pratique	
Mesure de contamination surfacique (Bq/cm ²)	Sonde bêta ou frottis	- En routine - Après chaque manipulation - En cas d'incident
Rejets atmosphériques (Bq/m ³)	Barboteur à carbone-14	Si le risque est élevé

Mesure de débit de dose ambiant (µSv/h)

Compte tenu de la faible énergie des rayonnements bêta émis par le carbone-14, la mesure du débit de dose ambiant est d'un intérêt très limité.

Mesure de la contamination surfacique (Bq/cm²)

La mesure d'une contamination surfacique peut être réalisée :

- soit directement avec un contaminamètre donnant une lecture en Bq/cm². Veiller à ce que l'appareil soit étalonné,

contrôlé et adapté à la mesure du carbone-14. En cas de doute, contacter le constructeur ;

- soit par la mesure d'un taux de comptage en impulsions par seconde au moyen d'une sonde bêta que l'on applique sur la surface à contrôler ;

- soit indirectement par un frottis (qui est ensuite compté par une sonde bêta ou par scintillation liquide) en ayant pris soin de définir une surface standard et un rendement de frottis représentatif des conditions de prélèvement. Dans tous les cas, la surface du frottis doit être égale ou inférieure à la surface du détecteur. L'utilisation du frottis est délicate compte tenu de la difficulté de proposer une valeur précise de rendement. Dans le cas où celui-ci ne peut pas être évalué, il est suggéré de retenir la valeur de 10 % tel qu'indiqué dans la norme NF-ISO 7503-1 relative à l'évaluation de la contamination de surface.

La mesure par frottis complète souvent la mesure directe pour distinguer une contamination labile d'une contamination fixée, ou en présence d'un environnement défavorable (rayonnement ambiant perturbant la mesure, géométrie non adaptée à la mesure directe...).

Relation entre le taux de comptage et l'activité surfacique

$$As = \frac{n}{Rd \times S \times K}$$

où As est l'activité surfacique en Bq/cm² ;
n est le taux de comptage en impulsions par seconde ;
Rd est le rendement de détection de la sonde en % (sous 4π) ;
S est la surface frottée ou la surface utile de la sonde en cm², selon le cas ;
K est le rendement de la mesure ou de frottis (K = 1 pour la mesure par taux de comptage, K = 0,1 par défaut pour la mesure par frottis).

Mesure de la contamination atmosphérique (Bq/m³)

Dans le domaine de la production de carbone 14, les niveaux de contamination dans l'air peuvent être évalués soit par piégeage sur un système à électrodéposition, suivi d'une spectrométrie, soit par barbotage et analyse dans une chambre d'ionisation différentielle.

5. MOYENS DE PROTECTION

Le choix des moyens de protection repose sur l'analyse préalable de l'intervention à réaliser (ou des protocoles expérimentaux) afin d'identifier le ou les risque(s) présent(s).

Le risque essentiel à considérer est le risque d'exposition interne.

Installation des locaux

Les locaux doivent être conçus en tenant compte des formes manipulées (gaz, vapeurs, aérosols) :

- le revêtement des sols, des murs, des plafonds et des surfaces de travail doit être en matériau lisse, imperméable, sans joint et facilement décontaminable ;

- les locaux, mis en dépression, doivent bénéficier d'une ventilation indépendante du système général de ventilation, le renouvellement d'air doit être de 10 volumes par heure pour le laboratoire chaud et de 5 volumes par heure pour les autres locaux ;
- le matériel de laboratoire utilisé pour le travail avec le carbone-14 ne doit servir qu'à cette seule fonction.

Protection contre l'exposition externe

Compte tenu de sa faible énergie, le rayonnement β émis par le carbone-14 ne peut pas pénétrer dans les tissus humains au-delà de 0,3 mm. Seul le risque d'exposition à la peau, ceci à courte distance de la source, est à prendre en compte. Par ailleurs, des écrans en plexiglas doivent délimiter les zones de manipulation et de stockage des déchets. À noter cependant que, pour des activités manipulées importantes, l'absorption du rayonnement β dans les parois des récipients peut générer un rayonnement électromagnétique, dit rayonnement de freinage, susceptible d'augmenter le risque d'exposition au niveau des extrémités.

Protection contre l'exposition interne

Des équipements de protection individuelle doivent être utilisés :

- gants jetables de plastique, de latex ou de caoutchouc (changés toutes les 15 à 20 minutes) : les gants constituent une barrière contre la contamination cutanée mais pas contre l'irradiation. Il est rappelé qu'après chaque manipulation, un contrôle de non-contamination et un lavage des mains sont nécessaires ;
- blouse à manches longues et fermée ;
- lunettes de protection.

Si le carbone-14 est utilisé sous forme de gaz ou de vapeur, un confinement dynamique est nécessaire ; l'utilisation sur pailleuse est interdite.

Lors de la manipulation de molécules marquées de faible activité, le travail sur pailleuse délimitée est possible si l'étude de poste démontre que le risque de remise en suspension des éléments manipulés est inexistant.

Pour la manipulation de fortes activités de carbone-14 (5 GBq), la manipulation en boîte à gants est obligatoire.

6. DÉLIMITATION ET CONTRÔLE DES LOCAUX

Délimitation des locaux⁽²⁾

La délimitation des locaux doit prendre en compte à la fois les risques d'exposition externe et interne liés aux sources manipulées et stockées (voir tableaux V et VI). En pratique, pour le carbone-14, la délimitation des locaux s'appuie essentiellement sur le risque d'exposition interne.

Sous réserve de la présence d'une signalétique adaptée, il est possible de limiter les zones réglementées à une partie du local dans lequel le carbone-14 est manipulé.

L'utilisation du carbone-14 a principalement lieu dans des zones de confinement (sorbonne, boîte à gants) qui seront délimitées comme zones contrôlées ou zones surveillées en fonction de l'activité utilisée. Les activités nécessitant un classement en zones contrôlée ou surveillée doivent, dans la mesure du possible, être regroupées géographiquement.

Contrôles⁽³⁾

Le contrôle de la contamination surfacique doit être réalisé après chaque manipulation et en cas d'incident sur les surfaces, matériels, écrans, mains... Les boîtes à gants et leur système de filtration doivent être contrôlés au moins une fois par an. Des contrôles de routine peuvent également être organisés afin de vérifier périodiquement l'état radiologique de la boîte à gants et des filtres d'extraction.

La manipulation du carbone-14 sous les formes gaz et vapeur doit être effectuée, selon les activités, sous sorbonne ou en boîte à gants. Les effluents gazeux susceptibles d'être rejetés dans l'environnement doivent être contrôlés. Ces contrôles peuvent être réalisés au moyen de barboteurs à carbone-14.

Le bon fonctionnement des appareils de mesure utilisés doit être vérifié au moins annuellement (et avant utilisation si ceux-ci n'ont pas été utilisés depuis plus d'un mois).

Par ailleurs, après toute manipulation et en sortie de zone réglementée, un contrôle de non-contamination corporelle doit être réalisé de manière systématique.

7. CLASSEMENT, FORMATION ET SURVEILLANCE DU PERSONNEL EXPOSÉ

Classement

Contrairement à la délimitation des zones de travail qui est fondée sur une évaluation des risques liés aux sources radioactives, le classement du personnel opérant dans ces zones est déterminé sur la base des résultats obtenus à la suite d'une étude de poste.

L'évaluation de la dose prévisionnelle annuelle, prenant en compte les expositions externe et interne aux différents postes occupés, permet de classer les travailleurs exposés en deux catégories, A et B. Ce classement n'est pas fondé sur l'affectation habituelle ou non en zone réglementée (surveillée ou contrôlée) mais sur un niveau de dose susceptible d'être atteint dans les conditions normales de travail. Les niveaux de référence sont fournis au *tableau VII*.

2 Arrêté du 15 mai 2006 relatif aux conditions de délimitation et de signalisation des zones surveillées et contrôlées et des zones spécialement réglementées ou interdites.

3 Arrêté du 26 octobre 2005 définissant les modalités de contrôle de radioprotection en application des articles R. 4452-12, R. 4452-14 à R. 4452-16 du code du travail et R. 1333-44 du code de la santé publique.

EXPOSITION EXTERNE ET INTERNE DE L'ORGANISME ENTIER

Dose efficace (E) susceptible d'être reçue en 1 h

	Zones réglementées				
	Zones spécialement réglementées				
Zone non réglementée ■ Dose efficace susceptible d'être reçue par un travailleur $E < 80 \mu\text{Sv}/\text{mois}$ ■ Contrôle de l'état de propreté radiologique si risque de contamination dans les zones réglementées attenantes	Zone surveillée gris-bleu $E < 7,5 \mu\text{Sv}$	Zone contrôlée verte $E < 25 \mu\text{Sv}$	Zone contrôlée jaune $E < 2 \text{ mSv}$ & $\text{DDD}^* < 2 \text{ mSv/h}$	Zone contrôlée orange $E < 100 \text{ mSv}$ & $\text{DDD}^* < 100 \text{ mSv/h}$	Zone rouge dite zone interdite $E > 100 \text{ mSv}$ ou $\text{DDD}^* > 100 \text{ mSv/h}$

* DDD : débit de dose

Tableau VI

EXPOSITION DES EXTRÉMITÉS (MAINS, PIEDS, CHEVILLES ET AVANT-BRAS)

Dose équivalente (H) susceptible d'être reçue en 1 h

	Zones réglementées				
	Zones spécialement réglementées				
Zone non réglementée Pas de valeur affichée	Zone surveillée gris-bleu $H < 0,2 \text{ mSv}$	Zone contrôlée verte $H < 0,65 \text{ mSv}$	Zone contrôlée jaune $H < 50 \text{ mSv}$	Zone contrôlée orange $H < 2,5 \text{ Sv}$	Zone rouge dite zone interdite $H > 2,5 \text{ Sv}$

▽ Critères de classement des travailleurs exposés Tableau VII

	Dose efficace	Dose équivalente mains, avant-bras, pieds, chevilles	Dose équivalente à tout cm^2 de la peau
Travailleurs exposés de catégorie A	$\geq 6 \text{ mSv}$ sur 12 mois consécutifs	$\geq 150 \text{ mSv}$	$\geq 150 \text{ mSv}$
Travailleurs exposés de catégorie B	$< 6 \text{ mSv}$ sur 12 mois consécutifs	$< 150 \text{ mSv}$	$< 150 \text{ mSv}$

Formation du personnel

Tous les personnels susceptibles d'intervenir en zone réglementée doivent bénéficier d'une formation à la radioprotection organisée par le chef d'établissement portant sur les risques d'exposition externe et interne, sur les procédures générales de radioprotection en vigueur ainsi que sur les règles de protection contre les rayonnements ionisants.

Une attention particulière doit être portée à la formation des travailleurs temporaires et des nouveaux entrants. Une formation (information) spécifique doit être réalisée avant la mise en œuvre de nouvelles manipulations.

Surveillance médicale du personnel

Les points importants sont les suivants :

- surveillance médicale renforcée, au moins annuelle, s'appuyant sur une fiche d'exposition établie par le chef d'établissement (copie dans le dossier médical) ;
- carte individuelle de suivi médical (contacter l'IRSN : www.siseri.com) ;
- attestation d'exposition professionnelle établie lors du départ du salarié, en s'appuyant sur la fiche d'exposition.

Aucune femme enceinte ne peut être affectée à un poste impliquant un classement en catégorie A. La dose de l'enfant à naître doit, dans tous les cas, rester inférieure à 1 mSv entre la déclaration de grossesse et l'accouchement. En cas d'allaitement, toute manipulation susceptible d'engendrer un risque de contamination interne doit être exclue.

Surveillance dosimétrique des travailleurs exposés

Exposition externe

La dosimétrie passive corps entier n'est pas justifiée, compte tenu de la faible énergie moyenne du rayonnement β du

carbone-14. Si des activités importantes sont manipulées, l'absorption du rayonnement β dans les parois des récipients peut générer un rayonnement électromagnétique, dit rayonnement de freinage, susceptible de présenter un risque notamment au niveau des extrémités. Une dosimétrie d'extrémités est alors recommandée.

Exposition interne

Elle doit être évaluée par analyse radiotoxicologique urinaire. En cas d'utilisation régulière de carbone-14, l'intervalle maximal entre deux examens est de 7 jours pour le carbone manipulé sous la forme organique, et de 6 mois pour la forme dioxyde (norme NF ISO 20553, juillet 2006). Dans le cas d'une utilisation plus ponctuelle, l'examen doit avoir lieu après chaque manipulation.

En cas de contrôle positif, le médecin du travail demandera des contrôles ultérieurs pour suivre l'évolution du niveau de l'exposition. Les circonstances de l'exposition seront analysées avec l'appui de la PCR.

8. EFFLUENTS ET DÉCHETS

Chaque établissement a le devoir de mettre en œuvre un plan de gestion individualisé définissant les modalités de tri, de conditionnement, de stockage, de contrôle et d'élimination des effluents et des déchets produits⁽⁴⁾. L'efficacité de ce plan repose sur une organisation garantissant la traçabilité des différents déchets (registres, étiquetages...).

Après décroissance, les déchets et les effluents doivent être éliminés, selon la filière appropriée en fonction de leur nature (banale, chimique, biologique...).

Les déchets et effluents doivent faire l'objet d'un tri répondant aux spécifications de l'ANDRA (les traitements ultérieurs ne sont pas les mêmes en fonction des caractéristiques des déchets). Ce tri consiste à séparer les déchets en prenant en compte leur nature physico-chimique et les risques spécifiques autres que le risque radiologique. Plusieurs catégories sont distinguées : solides compactables (SP), solides nécessitant une incinération (SC), solutions aqueuses (LA), solvants (LS), solides putrescibles (SO) et flacons de scintillation (SL). Pour aider les producteurs, l'ANDRA édite et diffuse chaque année un guide d'enlèvement détaillant les différentes catégories de déchets et la tarification associée.

Les déchets sont déposés dans des poubelles spécifiques dont l'ouverture doit pouvoir se faire à l'aide du pied puis sont stockés dans un local réservé.

Les liquides scintillants de carbone-14 sont récupérés dans les flacons de scintillation puis stockés dans des fûts dédiés de 120 litres récupérés par l'ANDRA.

Les effluents gazeux ne peuvent pas être rejetés sans un contrôle préalable. Les systèmes de filtration des enceintes ventilées doivent être contrôlés selon une périodicité définie par le plan de gestion des déchets et effluents radioactifs de l'établissement.

⁴ Arrêté du 23 juillet 2008 relatif à l'élimination des effluents et des déchets contaminés par des radionucléides.

9. PROCÉDURES ADMINISTRATIVES D'AUTORISATION ET DE DÉCLARATION

Application non médicale conduite dans un établissement ni industriel ni commercial

Une autorisation délivrée par l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) est requise au titre du code de la santé publique dès lors que l'activité détenue ou utilisée est égale ou supérieure à 10^7 Bq (activité totale) ou à 10^4 Bq/g (activité massique).

Application non médicale conduite dans un établissement industriel ou commercial

Dont aucune installation n'est soumise à autorisation au titre d'une autre rubrique de la nomenclature ICPE (détention d'un produit chimique, bruit...)

Une autorisation délivrée par l'ASN est requise au titre du code de la santé publique dès lors que l'activité détenue ou utilisée est égale ou supérieure à 10^7 Bq (activité totale) ou à 10^4 Bq/g (activité massique).

Dont au moins une installation est soumise à autorisation au titre d'une autre rubrique de la nomenclature ICPE

La déclaration ICPE auprès du préfet du département est imposée lorsque l'activité totale détenue est comprise entre 10^5 MBq et 10^6 MBq. L'autorisation ICPE est requise au-delà de 10^5 MBq et est délivrée par le préfet du département.

Application non médicale conduite dans un établissement industriel produisant du carbone-14

Une autorisation délivrée par l'ASN est requise au titre du code de la santé publique quelles que soient les activités mises en jeu.

10. TRANSPORTS SUR LA VOIE PUBLIQUE

Tous les transports ne sont pas soumis à la réglementation concernant le transport des matières dangereuses. Pour le carbone-14, si l'activité massique de la matière transportée est inférieure à 10 kBq/g ou si l'activité totale de l'envoi est inférieure à 10 MBq, la réglementation ne s'applique pas.

Si ces deux seuils sont dépassés, le transport est soumis aux exigences des règlements applicables; pour les transports par route, rail, voie fluviale, mer ou air, des arrêtés français rendent applicables les règlements ADR⁽⁵⁾, RID⁽⁶⁾, ADN⁽⁷⁾ ou ADN⁽⁸⁾, IMDG⁽⁹⁾ ou les instructions techniques de l'OACI⁽¹⁰⁾, respectivement. Tous ces règlements sont compatibles entre eux pour faciliter les transports multimodaux.

L'expéditeur est le premier responsable du respect des exigences qui sont détaillées dans ces règlements. En particulier, le

choix de l'emballage dépend du niveau de risque associé à la matière transportée. Un niveau d'activité de référence dit « A2 » permet de choisir le type de colis en fonction de l'activité contenue dans le colis. Pour le carbone-14, A2 vaut 3 TBq.

▽ Classement des colis selon l'activité du contenu

Tableau VIII

Type de colis	Activité du carbone-14 contenu	Exigences de conception du colis
Colis excepté	< 3 GBq (< A2/1 000)	Faibles : maintenir l'étanchéité et la protection contre les rayonnements en l'absence d'incident.
Colis de type A	< 3 TBq (< A2)	Moyennes : maintenir l'étanchéité et la protection contre les rayonnements en cas d'incident mineur (choc de manutention, pluie, etc.).
Colis de type B	> 3 TBq (> A2)	Fortes : maintenir l'étanchéité et la protection contre les rayonnements en cas d'accident sévère (collision, incendie, submersion).

L'expéditeur est également responsable de la signalisation des colis qui est destinée à limiter les risques d'exposition des personnes du public ou des travailleurs en cours de transport. Cette signalisation est effectuée par l'une des étiquettes 7A, 7B ou 7C représentées ci-dessous, choisie en fonction des débits de dose mesurés autour du colis.



▽ Correspondance entre la catégorie des étiquettes apposées au colis, l'indice de transport et le débit de dose

Tableau IX

Indice de transport (IT) ⁽¹¹⁾	Débit de dose (DDD) en tout point de la surface externe	Étiquette
0	DDD ≤ 5 µSv/h	I – BLANCHE
Plus de 0 mais pas plus de 1	5 µSv/h < DDD ≤ 500 µSv/h	II – JAUNE
Plus de 1 mais pas plus de 10	500 µSv/h < DDD ≤ 2 mSv/h	III – JAUNE
Plus de 10	2 mSv/h < DDD ≤ 10 mSv/h ⁽¹²⁾	III – JAUNE et transport exclusif

5 ADR : accord européen relatif au transport international des marchandises dangereuses par route.

6 RID : règlement concernant le transport international ferroviaire des marchandises dangereuses.

7 ADN : accord européen relatif au transport international des marchandises dangereuses par voies de navigation intérieures.

8 ADN R : règlement pour le transport de matières dangereuses sur le Rhin.

11. CONDUITE À TENIR EN CAS D'INCIDENT OU D'ACCIDENT

Le traitement de l'urgence vitale médico-chirurgicale prime sur toute action de décontamination.

Dès la découverte de l'événement :

- suivre les consignes affichées en tenant compte des circonstances de l'incident et des activités mises en jeu ;
- alerter la personne compétente en radioprotection, le responsable de l'installation et le médecin du travail ;
- contacter, si nécessaire, l'IRSN pour un appui technique (dispositif d'alerte de l'IRSN : 06 07 31 56 63).

Contamination des locaux et/ou du matériel

- Déterminer l'étendue de la zone contaminée (à l'aide d'une sonde bêta), délimiter et baliser un périmètre de sécurité. Il est à noter que l'utilisation de solutions colorées lors des manipulations faisant intervenir des radio-isotopes est recommandée afin de pouvoir détecter visuellement la contamination du poste de travail.
- Confiner le déversement ou la fuite.
- Avertir le personnel et éventuellement le faire évacuer.
- Décontaminer de l'extérieur vers l'intérieur avec du matériel jetable. Si les surfaces sont contaminées, il est recommandé d'utiliser des détergents de laboratoire. Le cas échéant, des solvants spécifiques aux types de molécules contaminantes peuvent être employés.
- En fin de décontamination, procéder à des contrôles (sonde bêta, frottis) afin de s'assurer de l'absence de contamination résiduelle.

Les personnes intervenant au cours de la décontamination doivent porter, *a minima*, des gants et une blouse. Si un risque de contamination atmosphérique est avéré, le port d'un appareil respiratoire filtrant, voire d'une tenue complète étanche, est recommandé.

Toute contamination de locaux et/ou de surface de travail doit conduire à rechercher une contamination éventuelle des personnes présentes.

9 IMDG : code maritime international des matières dangereuses, Organisation maritime internationale.

10 Instructions techniques de l'OACI : instructions techniques pour la sécurité du transport aérien des marchandises dangereuses, Organisation de l'aviation civile internationale.

11 IT = intensité de rayonnement maximale à 1 m de tout point situé à la surface du colis (en mSv/h) x 100 x k où k est un coefficient qui dépend de la géométrie du colis avec k = 1 pour les colis dont la plus grande section est de 1 m².

12 L'intensité en tout point de la surface externe ne peut dépasser 2 mSv/h que si le véhicule est équipé d'une enceinte qui, dans les conditions de transport de routine, empêche l'accès des personnes non autorisées à l'intérieur de l'enceinte, si des dispositions sont prises pour immobiliser le colis à l'intérieur de l'enceinte du véhicule et s'il n'y a pas d'opérations de chargement/déchargement entre le début et la fin de l'expédition.

Exposition externe et interne d'une personne

Exposition due à une source distante

Sans objet.

Contamination cutanée

- Contrôler avec du matériel adapté les mains, la blouse, les cheveux, la barbe, les chaussures, les sécrétions nasales (mouchage).

- Procéder à la décontamination par un lavage à l'eau savonneuse de préférence (ou un produit équivalent non abrasif) sans frotter afin de ne pas favoriser le passage transcutané du contaminant.

- Contrôler après la décontamination.

- Si une contamination cutanée persiste, un pansement étanche peut être placé sur la zone contaminée afin de faire transpirer la peau et faciliter l'élimination du radionucléide.

- Réaliser une analyse radiotoxicologique des urines.

Toute contamination du personnel doit être analysée car elle peut être le seul signe apparent d'une contamination d'un local ou d'une zone.

Contamination due à une projection oculaire

- Laver abondamment sous l'eau à température ambiante pendant 15 minutes.

- Consulter un médecin en lui indiquant la forme chimique du contaminant.

- Réaliser une analyse radiotoxicologique des urines.

Contamination interne

Toute contamination cutanée ou oculaire d'une personne doit faire suspecter et rechercher une contamination interne.

Cette situation impose l'intervention immédiate de la PCR et du médecin du travail qui, si nécessaire, feront appel à un service spécialisé ou à l'IRSN.

- Déterminer l'activité manipulée.

- Débuter immédiatement les prélèvements urinaires (durée: 24 heures et les jours suivants selon le niveau de la contamination) et les envoyer pour analyse à l'IRSN ou à un organisme agréé.

- Si le résultat est positif, le médecin du travail demande des analyses ultérieures pour suivre l'évolution de la contamination interne.

- Une thérapeutique spécifique incluant notamment la dilution isotopique et la diurèse forcée peut être envisagée sous contrôle médical.

Exemple d'évaluation de la dose efficace engagée

Dans le cas d'un recueil des urines, le calcul de la dose peut s'effectuer de la manière suivante :

$$I = A_m / F(t)$$

$$E(\text{Sv}) = I(\text{Bq}) \times \text{DPUI} (\text{Sv/Bq})$$

Avec

E = dose efficace engagée

I = activité incorporée au jour de la contamination

A_m = activité mesurée (soit en excrétion, soit en rétention) au jour t après la contamination

F(t) = fraction excrétée ou retenue au jour t pour 1 Bq incorporé

DPUI = dose par unité d'incorporation

Exemple numérique

Inhalation de carbone-14 sous forme particulaire de type M. L'analyse des urines des 24 heures prélevées dans les 3 premiers jours suivant la contamination donne les résultats ci-après :

$$A_1 = 96 \text{ Bq sur 24 h}$$

$$A_2 = 156 \text{ Bq sur 24 h}$$

$$A_3 = 171 \text{ Bq sur 24 h}$$

Le *tableau X* donne l'excrétion urinaire mesurée au jour t, en Bq par Bq inhalé (5 μm) et ingéré, pour le carbone-14. Ces valeurs de F(t) ont été évaluées au moyen du logiciel IMBA Professional (Health Protection Agency – GB).

Évaluation de l'activité incorporée sur la base des mesures d'excrétion à J1, J2 et J3 :

$$\text{à J1 : } I = 96 / 9,3 \cdot 10^{-6} = 1,10^7 \text{ Bq}$$

$$\text{à J2 : } I = 156 / 1,8 \cdot 10^{-5} = 8,7 \cdot 10^6 \text{ Bq}$$

$$\text{à J3 : } I = 171 / 1,9 \cdot 10^{-5} = 9,0 \cdot 10^6 \text{ Bq}$$

L'activité incorporée est égale, en première approche, à la moyenne arithmétique des trois valeurs de I :

$$I = 9,2 \cdot 10^6 \text{ Bq}$$

Ce qui donne en prenant la DPUI correspondante (*voir tableau III*) :

$$E = 9,2 \cdot 10^6 \times 1,7 \cdot 10^{-9} = 1,6 \cdot 10^{-2} \text{ Sv soit } 16 \text{ mSv}$$

▽ Excrétion urinaire mesurée au jour j, en Bq par Bq incorporé, pour le carbone-14

Tableau X

Temps en jours après l'incorporation	Inhalation (5 μm)			Ingestion
	F	M	S	
1	$7,0 \cdot 10^{-5}$	$9,3 \cdot 10^{-6}$	$5,2 \cdot 10^{-7}$	$1,17 \cdot 10^{-4}$
2	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-5}$	$1,19 \cdot 10^{-6}$	$2,68 \cdot 10^{-4}$
3	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$1,9 \cdot 10^{-5}$	$1,25 \cdot 10^{-6}$	$2,79 \cdot 10^{-4}$
4	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$1,9 \cdot 10^{-5}$	$1,23 \cdot 10^{-6}$	$2,75 \cdot 10^{-4}$
5	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$1,9 \cdot 10^{-5}$	$1,22 \cdot 10^{-6}$	$2,70 \cdot 10^{-4}$
6	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-5}$	$1,20 \cdot 10^{-6}$	$2,66 \cdot 10^{-4}$
7	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-5}$	$1,18 \cdot 10^{-6}$	$2,61 \cdot 10^{-4}$
8	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-5}$	$1,16 \cdot 10^{-6}$	$2,57 \cdot 10^{-4}$
9	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-5}$	$1,15 \cdot 10^{-6}$	$2,52 \cdot 10^{-4}$
10	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-5}$	$1,13 \cdot 10^{-6}$	$2,48 \cdot 10^{-4}$

Déclarations à effectuer

Tout incident ou accident doit être consigné dans le registre d'hygiène et de sécurité.

Tout accident du travail doit être déclaré par l'employeur auprès de la caisse primaire d'assurance maladie.

Tout accident ou incident significatif doit être déclaré dans les meilleurs délais auprès de la division territoriale compétente de l'ASN selon les dispositions en vigueur⁽¹³⁾.

En cas de dépassement d'une limite de dose annuelle, l'inspecteur du travail doit également être prévenu.

¹³ Guide ASN/DEU/03 relatif aux modalités de déclaration et à la codification des critères relatifs aux événements significatifs dans le domaine de la radioprotection hors installations nucléaires de base et transports de matières radioactives.

Cette fiche a été élaborée par un groupe de travail animé par l'INRS et l'IRSN auquel ont participé des experts de l'AP-HP, CEA, CH de Poissy-St-Germain, CNRS, EDF, INSERM, ainsi que l'ASN et la DGT.

Les experts qui ont plus particulièrement contribué à cette fiche sont :

- Jean-Michel Deligne (IRSN),
- Alain Despres (IRSN),
- Laurent Donadille (IRSN),
- Denis-Jean Gambini (APHP),
- Christine Gauron (INRS),
- Gilbert Herbelet (CH Poissy-St Germain),
- Alain Rannou (IRSN),
- Gilles Sert (IRSN),
- Jean-Pierre Servent (INRS).